黄河流域生态系统质量与稳定性研究（1980-2019）

张金良，曹智伟*，谭培影，张超，郭鹏程，金鑫
（黄河勘测规划设计研究院有限公司，河南 郑州 450003）

摘要：质量与稳定性是生态系统基本特征，综合反映了生态系统结构、过程、功能完整性和抵抗干扰、自我调节、动态平衡的能力。黄河流域是一个由众多元素构成的复杂巨系统，流域生态系统治理保护工作受到越来越多的关注，需要从生态系统整体性出发，统筹考虑、综合施策，提高生态系统质量和稳定性，促进生态系统良性循环，因而系统质量和稳定性的定量描述至关重要。本文利用熵权模型，建立多指标长时间序列的生态系统质量评价指数（EQI）定量描述黄河流域 40 年来的生态质量变化；同时，利用耗散结构理论和布鲁塞尔器模型建立生态系统稳态转化的量化指标和方法，为黄河流域生态系统稳态转化研究提供思路。研究发现：（1）黄河流域生态系统 40 年 EQI 值平均为 0.64，最大值为 0.70，最小值为 0.59，总体质量呈现震荡式向好趋势；（2）多年系统稳态转换动力值均小于 0，表明黄河流域生态-人类社会耦合系统的稳态转换力较低，但整体呈现震荡式上升趋势，整体趋势与达到稳态转换的临界条件越来越近。

关键词：黄河流域；生态系统；质量；稳定性；熵权；耗散结构；稳态转换
中图分类号： **文献标识码：**A

Ecosystem quality comprehensive evaluation and stability analysis of Yellow River Basin in 1980—2019

ZHANG Jinliang, Cao Zhiwei*, Tan Peiying, Zhang Chao, Guo Pengcheng, Jin Xin
(Yellow River Engineering Consulting Co.Ltd，Zhengzhou 450003，China)

Abstract:

Quality and stability are the basic characteristics of the ecosystem, which comprehensively reflect the structure, process, and functional integrity of the ecosystem and the ability to resist interference, self-regulation, and dynamic balance. The Yellow River Basin is a complex giant system composed of many elements. The management and protection of the river basin ecosystem has received more and more attention. It is necessary to start from the integrity of the ecosystem, make overall considerations, and implement comprehensive policies to improve the quality and stability of the ecosystem, and promote a virtuous cycle of the ecosystem, so the quantitative description of system quality and stability is very important. This paper uses the entropy weight model to establish a multi-index long-term series of Ecosystem Quality Index (EQI) to quantitatively describe the changes in ecological quality in the Yellow River Basin in the past 40 years; at the same time, use the dissipative structure theory and the Brussels model to establish the steady-state transformation of the ecosystem Quantitative indicators and methods provide ideas for the study of steady-state transformation of the Yellow River Basin ecosystem. The study found that: (1) The average EQI value of the Yellow River Basin ecosystem over the past 40 years is 0.64, the maximum value is 0.70, and the minimum value is 0.59. The overall quality is showing an oscillating trend for improvement; (2)

本文系中国工程院咨询研究项目（项目编号：2019-XZ-65）的研究成果之一。

The steady-state conversion power value of the system is less than 0, indicating that the steady-state conversion power of the ecological-human-society coupling system in the Yellow River Basin is low, but the overall trend is oscillating upward, and the overall trend is getting closer and closer to the critical conditions for achieving steady-state conversion.
Keywords: Yellow River Basin； Ecosystem； Quality； Stability； Entropy Weight； Dissipative Structure； steady state transformation

生态系统是人类社会可持续发展的基础。生态系统为人类生存和发展提供了条件，人类活动也改变了生态系统。随着人类社会的快速发展，水资源紧张、水环境污染、生物多样性减少等生态环境问题不断增加，这些问题加剧了生态系统质量的下降[1-3]。近年来，生态系统保护修复受到越来越多的关注，十九届五中全会明确提出，“提升生态系统质量和稳定性”[4]，因此分析评价生态系统质量和稳定性具有重要的现实意义。

生态系统质量主要表现为生产能力、受干扰后的变化和对人类生存和社会经济可持续发展的影响，生态系统稳定性则是对外界干扰条件的响应，因此一般认为生态系统质量包含生态系统的稳定性。陈强等[5]基于熵权法，利用生态系统生产能力指数、稳定性指数和承载力指数构建了洞庭湖生态系统质量综合评价模型；梁变变等[6]同样从生态系统生产力、稳定性、承载力出发，构建石羊河流域生态质量评价指数。虽然这些研究中都将稳定性作为生态系统质量评价的一方面，但是更多关注在一定时间和范围内的单个指标即生产能力的波动状况，稳定指数构成较单一、不系统，并未将稳定性作为系统内部多指标整体特性进行考虑，且使用数据时间序列较短。

生态系统的稳定性指生态系统对外界条件干扰的响应，体现为生态系统的内部调整[5]。生态动力学认为系统具有多种（局部）稳态，跨越表征系统关键变量的临界阈值，系统可以在不同稳态间相互转换[7, 8]。生态系统稳态转换是大规模的、突发的、持续很长时间的变化[9]。系统稳态丧失可能会导致生态系统功能不连续，土壤侵蚀、荒漠化、地下水枯竭、生物多样性丧失等不可逆转的严重后果。但是部分决策系统中并不能预测或观测到这种信号，或将这种信号错误解读，这往往是忽视了生态系统动态变化（如系统状态转化阈值、缓冲能力和恢复力的丧失等[10]因素）所导致的。目前关于系统的稳态转换研究主要集中在稳态转化识别和驱动机制分析两个方面。稳态转换识别方法包括统计分析法和模型分析法两大类[11]。但统计分析法需要长时间序列的数据收集[12]，模型分析则主要通过系统动力学模型、均衡模型等方法，选取相关指标，建立系统内部反馈机制，识别稳态转换[13]，在稳态转换识别的基础上，进行其驱动机制的分析[14]。郛建国[15]认为利用耗散结构理论来分析、讨论生态系统的稳态等问题具有合理性、准确性等特点。布鲁塞尔器模型是量化分析耗散结构的数学模型，在企业管理、金融等专业得到了广泛应用[16, 17]，赵焱等[18]将其转义后应用于水资源复杂系统中，研究水资源复杂系统内部、外部因子的变化对系统总体状况产生的影响和演化分析。

黄河流域是一个复杂的巨系统，其中包含河流、湖泊、森林、草原、湿地、荒漠、戈壁等丰富的生态环境要素，这些要素与外部环境不断进行着物质循环与能量流动，在维持黄河健康生命中具有重要作用，也同时构成了我国重要的生态屏障。黄河绵延万里，连接着青藏高原、黄土高原和华北平原，是横跨三级阶地

的全国性生态廊道。人类活动加剧和不合理的开发利用导致黄河流域环境持续变化，生态系统退化、水源涵养能力降低、水土流失严重、支流污染、湿地萎缩等问题突出。近年来，国家在黄河流域持续开发的防洪减灾、水沙治理、水土保持等重大工程成效显著，并确立了从生态系统整体性出发，统筹考虑、综合施策，提高生态系统质量和稳定性，促进生态系统良性循环[19]的思路，这些措施驱动了生态系统发生稳态转换。因此，关注流域生态系统稳态转换，探索其演变规律，采取修复措施或鼓励政策，对避免发生稳态丧失或促进稳态转换，保障生态系统的可持续性具有重要意义。

本文利用熵权模型，建立多指标长时间序列的生态系统质量评价指数，将其应用在黄河流域生态-人类社会耦合系统的质量综合评价中。基于黄河自身特点，并考虑到环境政策变化，为识别新形势下黄河流域生态系统的稳态转换，本文利用耗散结构理论和布鲁塞尔器模型建立量化生态系统稳态转化的评价指标和方法，分析生态系统与外界环境的正负反馈机制，为黄河流域生态系统稳态转化研究提供思路，也为生态系统的质量和稳定性研究提供科学依据。

1 研究区域、数据与方法

1.1 研究区域

黄河全长5464公里，流域总面积79.5万km^2，是我国仅次于长江的第二大河，也是我国乃至世界上输沙量最大、含沙量最高的大河。黄河流域横跨我国东中西三大区域，构成我国重要的生态屏障，是连接青藏高原、黄土高原、华北平原的生态廊道，在我国生态安全方面具有重要的地位。黄河流经九个省（区），流域九省2019年底总人口4.5亿，约占全国总人口的32%；地区生产总值23.9万亿元，约占全国24%左右，是我国的重要经济地带和能源基地。

1.2 质量评价指标体系构建及数据来源

本文综合考虑黄河流域“山水林田湖草沙人”生命共同体特征，以系统性、全面性和可获取性为原则选取 22 项指标构建黄河流域生态系统质量综合评价体系与方法，将生态-人类社会质量指标体系分为目标层、准则层、指标层三个层次[20]，每个层次选择代表性指标反应水文情势、水体质量、生境质量、人类活动、经济发展等的变化状况，具体指标体系见表 1。

表 1 生态-人类社会系统综合评价指标体系构建及数据来源

Table 1 Construction of comprehensive evaluation index system and data sources of ecological-economic social system

序号	目标层	准则层	指标	单位	数据来源
1	生态系统	水文情势	总水量（年径流量）	亿 m^3	中华人民共和国水文年鉴 黄河流域水文资料
2	生态系统	水文情势	来沙量	亿 t	中华人民共和国水文年鉴 黄河流域水文资料
3	生态系统	水文情势	重要断面生态基流保证率	%	断面水文资料
4	生态系统	水环境因素	重要水功能区水质达标率	%	《中国水资源公报》

5	生态系统	水环境因素	重要支流水质达到或优于III类河长比例	%	《中国水资源公报》
6	生态系统	生态因素	生境质量指数		根据中科院资源环境科学与数据中心的土地利用空间数据集计算
7	生态系统	生态因素	植被覆盖指数		根据中科院资源环境科学与数据中心的 NDVI 空间数据集计算
8	生态系统	生态因素	水网密度指数		根据中科院资源环境科学与数据中心的土地利用空间数据集、河网空间数据集、规划院提供的水资源量计算
9	生态系统	生态因素	土地胁迫指数		根据黄委上中游局提供的土壤侵蚀模数、土壤类型、面积计算
10	生态系统	生态因素	黄土高原水土流失治理面积	km^2	黄委上中游局提供
11	生态系统	生态因素	典型区域湿地面积变化率	%	根据 Landsat 卫星遥感影像解译
12	人类社会系统	气候因素	年降水总量	mm	沿黄九省区年降水总量之和
13	人类社会系统	气候因素	平均气温	℃	沿黄九省区年平均气温
14	人类社会系统	社会发展因素	常住人口	万人	各省统计局官网近四十年统计年鉴
15	人类社会系统	社会发展因素	城镇化率	%	各省统计局官网近四十年统计年鉴
16	人类社会系统	社会发展因素	城镇居民人均可支配收入	元	各省统计局官网近四十年统计年鉴
17	人类社会系统	社会发展因素	GDP 增长率	%	各省统计局官网近四十年统计年鉴
18	人类社会系统	社会发展因素	人均 GDP	元/人	各省统计局官网近四十年统计年鉴
20	人类社会系统	社会发展因素	夜晚灯光指数		DMSP 卫星数据
19	人类社会系统	水资源因素	灌区面积	千公顷	各省统计局官网近四十年统计年鉴
21	人类社会系统	水资源因素	耗水率	%	根据耗水量计算
22	人类社会系统	水资源因素	流域用水总量	亿 m^3	《中国水资源公报》

指标数据种类主要包括基础数据和行业（专业）数据。基础数据以遥感、测绘、地理信息等数据为主；行业（专业）数据主要从黄河流域日常业务和研究中筛选广泛应用的相对成熟的时空序列数据。对收集来的数据，从空间和时间两个维度进行整理，空间上将分区域或分河段的数据通过加权平均归集到流域尺度上，时间上以年为单位将各类数据整理为数据序列，时间跨度为 1980 年~2019 年，共计 40 年数据。由于某些历史原因，少量数据有缺失，根据不同情况，合理分析后，采用直线插值、样条插值、拉格朗插值及灰色预测法[21]等进行数据补齐。

1.3 熵权模型

熵权模型是综合指标法常用的数学评估模型[22]，本文利用熵权模型对生态系统的质量进行综合评价，具体方法见张远生等[23]的研究。

（1） 确定指标评价标准（阈值、等级划分）

（2） 计算可能度函数

（3） 计算指标熵值

$$p_{ij} = \frac{f_{ij}}{\sum_{j=1}^{n} f_{ij}} \tag{1}$$

$$S_i = \frac{1}{\ln n}\sum_{j=1}^{n}(p_{ij}\ln p_{ij}) \tag{2}$$

其中 f_{ij} 为可能度函数，p_{ij} 为各标准可能度函数值在所有值中的比重，n 为指标标准区间的个数。

（4） 计算熵权

$$w_i = \frac{1-S_i}{N-\sum_{i=1}^{N} S_i} \tag{3}$$

N为对应指标的数目，S_i和w_i分别代表对应指标熵值和权重。

（5） 计算质量评价指数

$$S = \sum_{i=1}^{N}(w_i * S_i) \tag{4}$$

总熵值 S 越大，质量越低，因此定义生态质量综合评价指数 Ecosystem Quality Index（EQI）为：

$$EQI = 1 - S \tag{5}$$

黄河流域生态系统是由河流、生态环境、社会经济等元素构成的开放的远离平衡态的复杂巨系统。本文基于前期研究提出的评价流域生态环境状态的环境发展指数 Environment Development Index （EDI）[24]，统筹考虑了流域的河流、生态环境、社会经济等元素的相互影响，构建了综合评价流域生态质量指数 Ecosystem Quality Index（EQI）。EQI 通过熵权耦合分析，数值越大表示流域发展质量越高，越趋于良性循环；数值越小表示流域发展质量越低，所处状态存在一定的问题。

1.4 布鲁塞尔器模型

从生态系统不同层次来讲，稳定性可以是种群稳定性、群落稳定性、系统稳定性、生态功能稳定性；从不同的时空尺度来讲，生态系统又可以分长期稳定性、短期稳定性等。稳态转换研究主要涉及生态学上的中等时间尺度（数十年），该时间尺度正好接近于人类易于感知或操控的时间尺度，因此有必要对稳态转换加以关注，帮助人类管理生态系统，保障其可持续性[25]。Holling[26]认为原始的生态系统，经历了多个不同的稳定平衡状态，在人类活动（资源利用、污染等）的影响下，生态系统可能从一个稳定平衡状态转变为另一个稳定平衡状态，而且往往会导致物种濒危等严重的生态后果。系统多重稳态可以用一种直观描述系统动态特征的方法来表述，即稳定景观（Stability Landscape），如图 1 所示。

图 1 的稳定景观图变化较直观地描述了系统的稳态转换过程。图中小球代表系统，稳定性景观图波峰位置代表稳态转换临界值，波谷位置代表不同稳态，系统在扰动作用下发生波动，当扰动作为驱动力使系统到达稳态转换临界值（波峰）时，系统可能会在另一个稳态位置平衡；而当系统由于参数变化致使稳定景观发生变化，初始稳定平衡被改变，则系统必须在另一个稳态位置达到平衡。

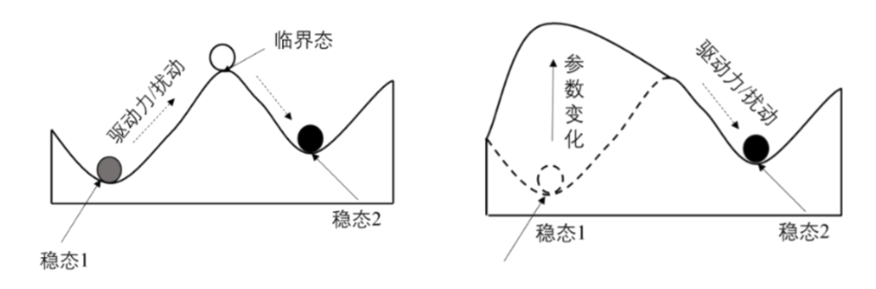


图 1 扰动和参数变化导致稳定景观图变化

Fig.1 Disturbance and parameter vary lead to stable landscape changes

虽然稳态景观图可以利用生态景观的含义对抽象的稳态转换概念进行具体描述，但其无法定量化描述系统内部稳态转换。生态系统具有复杂性，其内部各组分具有非线性关联的特征，系统状态的涨落特征以及系统内部的时空异质性等复杂特征[27]，因此认为生态系统是一类耗散结构的复杂系统[15, 28]，它满足耗散结构开放性、远离平衡态、非线性、涨落和突变的特点，因此可以利用耗散结构理论研究生态系统动力机制，定量化系统内部稳态转化驱动力。

布鲁塞尔器模型是普利高津提出的可以量化分析耗散结构的数学模型，赵焱等[18]将其转义后应用于水资源复杂系统中，研究水资源复杂系统内部、外部因子的变化对系统总体状况产生的影响和演化分析。同样地，我们可以将黄河流域生态-人类社会耦合系统分为内部系统（生态系统）和外部（社会经济系统）两部分，将布鲁塞尔器模型中的各个参数进行转义，变为生态-社会经济系统熵研究的变量。内部正熵是无序本因，内部无序化发展，正熵增加，有序化发展正熵减少；外部环境熵（即负熵）是有序来源，外部因素对生态不利，生态负熵减少，外部环境对生态有利，生态负熵增加。系统在内部正熵流和外部负熵流共同作用下有序演化发展。布鲁塞尔器模型可以描述为：

$$A \xrightarrow{K_1} X$$
$$B + X \xrightarrow{K_2} Y + D$$
$$Y + 2X \xrightarrow{K_3} 3X$$
$$X \xrightarrow{K_4} E \quad (6)$$

转义后模型参数 A 代表生态系统正熵流（生态系统内部因素），B 代表系统负熵流（人类社会对生态系统造成的干扰），D 代表正负熵流相互作用下系统稳态转换的低动力状态,E 代表正负熵流相互作用下系统稳态转换的高动力状态,X 代表系统正熵流指标体系的可量化因子,Y 代表系统负熵流指标体系的可量化因子。因此，生态-人类社会耦合系统熵流关系可以用布鲁塞尔器进行描述。根据布鲁塞尔器的方程和推论，当$|B| > 1 + A^2$时，系统才能成为耗散结构，因而对生态-人类社会耦合系统而言，可利用下式判断系统稳态的驱动力大小：

$$|B| - (1 + A^2) \begin{cases} < 0, & \text{系统稳态转换动力低} \\ = 0, & \text{系统稳态转换临界值} \\ > 0, & \text{系统稳态转换动力高} \end{cases} \quad (7)$$

当$|B| - (1 + A^2)$的值等于 0 时，到达稳态转换的临界状态，即图 1 中的波峰位置，准备向新的稳态转换；当值小于 0 时，系统内部以正熵演变为主，稳态仍然位于原有波谷位置，值越大，表明正熵为主的系统中，负熵逐步增加弱化了正熵熵增的态势，改变了现有稳态下转换力低的状况；当值大于 0 时，系统随着负熵引入突破了临界状态，进入稳定景观图另一个波谷位置，在新的稳态下演变，系统各指标通过相互影响提高了系统稳态转换的动力，值越大，稳态转换力越高。

因此生态-社会经济稳态转换驱动力的大小可以用布鲁塞尔器模型来进行量化计算，具体步骤如下：

（1）评价指标划分，如表 1 所示:

根据表 1 目标层，将指标划分为内部系统（生态系统）指标和外部系统（人类社会系统）指标两部分，分别为 n、m 个；

（2）利用熵权模型，分别计算内部系统正熵值 A 和外部系统负熵值 B ，计算方式与 1.3 相同：

$$A = \sum_{i=1}^{n} (w_{i,A} * S_{i,A}) \quad (8)$$

$$B = \sum_{i=1}^{m} (w_{i,B} * S_{i,B}) \quad (9)$$

其中 $S_{i,A}$ 和 $w_{i,A}$ 分别代表对应内部系统指标熵值和权重，n 代表内部系统指标个数； $S_{i,B}$ 和 $w_{i,B}$ 分别代表对应内部系统指标熵值和权重，m 代表外部指标个数。

（3）系统稳态转换力的计算：

$$转换力 = |B| - (1 + A^2) \quad (10)$$

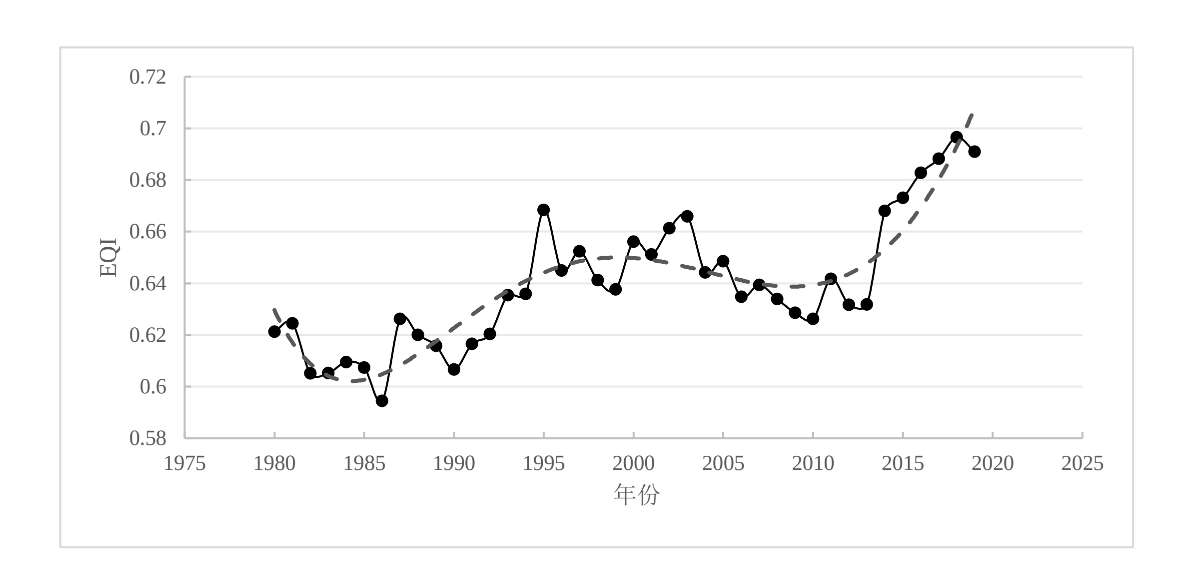
2 结果与分析

2.1 生态质量评价指数分析（EQI）

（1）EQI 值变化及分析

由图2可以发现，1980-2019年来，黄河流域生态系统EQI总体呈现震荡式向好发展，平均值为0.64，最大值为0.70（2018年），最小值为0.59（1986年），总体呈现质量向好趋势，1982年开始略有下降，1995年EQI迅速上升后，出现一个较平稳且小幅下降阶段，2014年又重新呈快速增长趋势。可以将其分为“波峰-波谷-波峰”式的两阶段，即1980-1986-1995年阶段、1996-2010-2019年阶段，这两个阶段都是先下降再上升的趋势。

1980-1986-1995年是1978年改革开放后，加快社会主义现代化建设和经济发展的阶段，经济发展方式粗放，重点追求GDP增长率，引发一系列生态环境问题，EQI整体呈下降趋势，但是1979年三北防护林工程、1984年黄河防护林工程的开展，也促进了生态系统的逐步好转，因此，1986年后EQI呈上升趋势，总体发展较为震荡、无序；1995-2010-2019年经济发展经历了由粗放式向集约型的转变，1995-2010由于各项政策和对外贸易的支持，经济快速增长，同时资源过度消耗、环境污染也日益严重，系统整体呈下降趋势，2010年后人类社会进入健康发展阶段，在追求经济增长的同时，注重生态的保护和治理，黄土高原水土保持治理、污染防治攻坚战等生态文明建设都促使系统EQI呈现增长趋势。



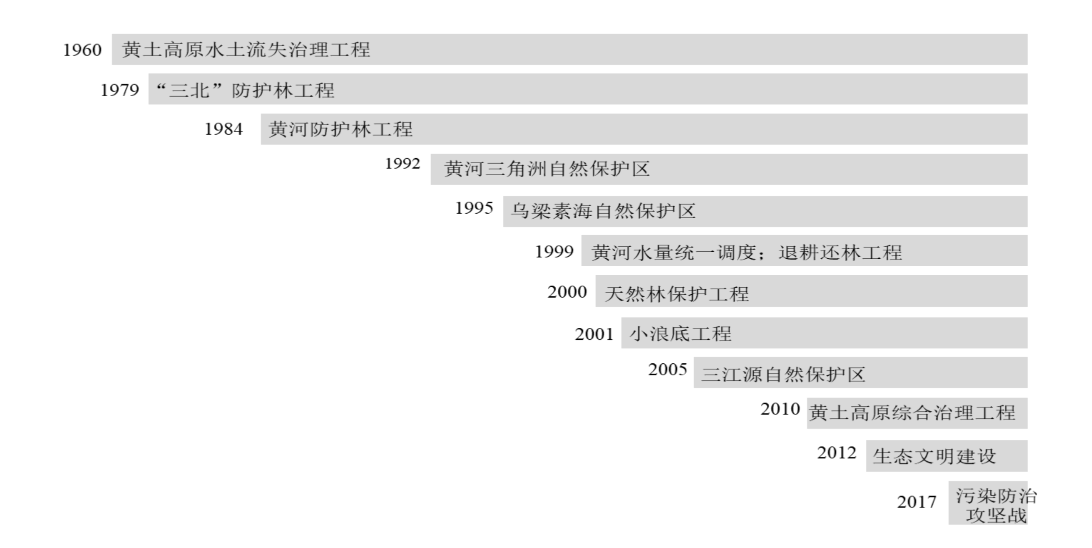
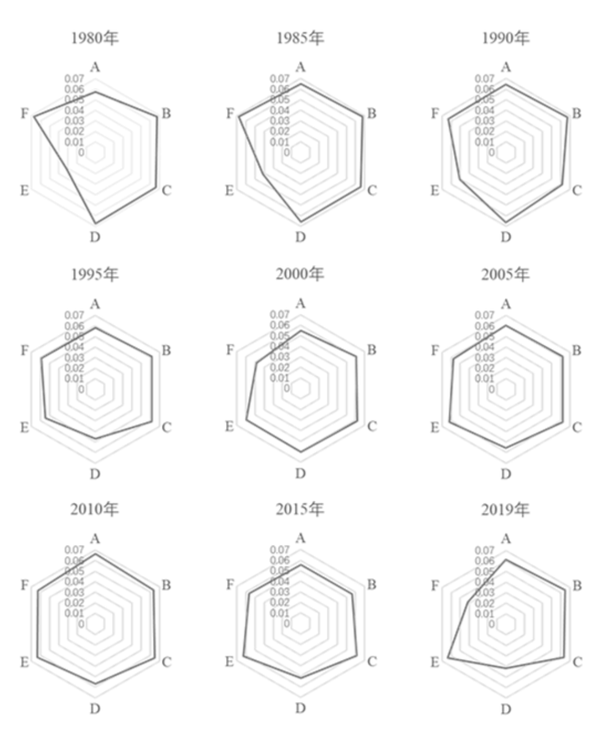


图 2 1980-2019 年黄河流域生态系统 EQI 值变化

Fig. 2 Changes in EQI values of ecosystems in the Yellow River Basin from 1980 to 2019

（2）不同准则层对生态系统总熵的贡献程度

由图 3 可知准则层复合指标对生态系统质量 EQI 的贡献情况，贡献程度越大，指标越敏感，需要采取措施进行管理或加强监管。总体而言，环境发展质量、水文情势、气候因素对 EQI 的影响一直很大；而社会发展因素在 1980-1990 年间最为重要，从 2010 年后贡献度逐年降低，这是因为社会发展逐步稳定导致的；水环境因素（水质）在 1980 年贡献度最小随后逐年增大，在 2019 年成为贡献度最大的因素，这是因为随着经济的快速发展，黄河干、支流污染日益严重造成的。虽然经过水体污染控制与治理科技重大专项，污染防治攻坚战等政策的实施，黄河流域尤其是干流断面水质有了极大的提升，但由于滞后效应，在现阶段水环境因素依然是敏感因素，需要加强监管，维持和提升流域水质；水资源因素的贡献度也逐年下降，这是因为近年来逐步完善了水资源节约与高效利用体系，强化了农业节水，建设节水型社会，建立黄河流域水资源承载能力监测预警机制，强化水资源刚性约束，适度开源，加快区域调水缓解供水压力等措施的实施，使流域水资源得到了合理规划和高效利用。

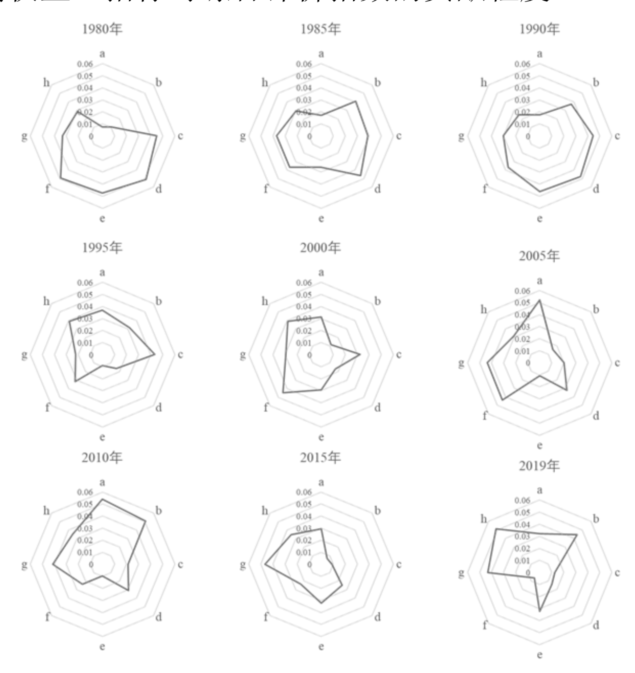


A 生态因素　B 水文情势　C 气候因素　D 社会发展因素　E 水环境因素　F 水资源因素

图 3 黄河流域生态质量综合评价不同准则层要素贡献程度

Fig.3 Contribution degrees of different criterion-level elements in the comprehensive assessment of ecological quality of the Yellow River Basin

(3）关键（高权重）指标对综合评价指数的贡献程度



a　GDP 增长率　b 居民平均收入　c 流域用水总量　d 年降水总量

e 重要水功能区水质达标率　f 典型区域湿地面积变化率　g 来沙量　h 水网密度

图 4 黄河流域生态-人类社会耦合系统质量综合评价关键指标贡献程度

Fig.4 Contribution degrees of key indicators for comprehensive evaluation of the quality of the ecological-human society coupling system in the Yellow River Basin

对生态-人类社会耦合系统中各指标在 1980-2019 中每年最高权重次数进行统计分析，选取出现频率比较高的八个指标：GDP 增长率（18 次）、重要水功能区水质达标率（15 次）、典型区域湿地面积变化率（11 次）、来沙量（10 次）、居民平均收入（8 次）、流域用水量（7 次）、年降水总量（5 次）、水网密度（3 次）进一步分析重要指标对耦合系统的贡献程度。

由图 4 可知重要指标对生态-人类社会耦合系统的贡献情况。总体上，1980-1990 年，流域用水总量、年降水总量、重要水功能区水质达标率贡献值较大，1995-2005 年，GDP 增长率、流域用水总量、典型区域湿地面积变化率对系统影响较大，2010-2019 年，来沙量、居民平均收入成为影响系统的关键因素。

2.2 生态系统稳定性

从表 2 和图 5 可以看出 1980-2019 年系统稳态转换动力值均小于 0，表明黄河流域生态-人类社会耦合系统的稳态转换力较低，但整体呈现震荡式上升趋势，整体趋势与达到稳态转换的临界条件越来越近。系统正熵值呈上升趋势，负熵值呈下降趋势。正熵值变化相对负熵值较小，说明系统在 40 年间内部发展没有出现巨涨落，发展状态较为稳定。负熵值呈现较大幅度降低，绝对值呈上涨趋势，说明在系统外部变化、政策、发展理念、修复工程的影响下，系统内部与外部进行了有利发展的物质、能量和信息的交换，令系统无序性变小。同时根据布鲁塞尔器模型的计算结果，系统稳态转换动力不断增加，也预示着黄河流域生态系统将进入新形势下的发展阶段，需要采取措施延缓这种转变，或采取新的措施驱使这种转变以期迈入更加高质量的稳态发展阶段，实现生态系统可持续发展和人类社会的协同发展。

表 2 1980-2019 年间黄河流域生态-人类社会系统正熵流、负熵流及稳态转换动力值

Table 2 Dynamic values of positive entropy flow, negative entropy flow and steady-state transformation of the ecological-economic social system of the Yellow River Basin from 1980 to 2019

年份	正熵流	负熵流	稳态转换动力	年份	正熵流	负熵流	稳态转换动力
1980	0.31403	-0.65322	-0.44539	2000	0.34297	-0.86851	-0.24912
1981	0.31407	-0.6655	-0.43314	2001	0.34406	-0.84697	-0.27141
1982	0.34465	-0.66889	-0.44989	2002	0.33182	-0.86389	-0.24621
1983	0.35344	-0.68766	-0.43726	2003	0.33409	-0.89425	-0.21737
1984	0.37114	-0.76624	-0.3715	2004	0.37077	-0.8804	-0.25707
1985	0.37642	-0.76285	-0.37884	2005	0.37648	-0.90503	-0.23671
1986	0.37378	-0.68826	-0.45145	2006	0.39506	-0.88416	-0.27191
1987	0.35116	-0.77394	-0.34937	2007	0.40123	-0.91522	-0.24577
1988	0.36805	-0.79218	-0.34328	2008	0.39197	-0.87305	-0.28059
1989	0.37528	-0.7891	-0.35174	2009	0.39579	-0.85548	-0.30117
1990	0.39673	-0.79505	-0.36234	2010	0.4125	-0.88056	-0.2896
1991	0.36962	-0.77398	-0.36264	2011	0.38599	-0.8943	-0.25469

1992	0.36938	-0.78873	-0.34771	2012	0.41173	-0.8963	-0.27322
1993	0.37021	-0.85338	-0.28368	2013	0.43222	-0.92449	-0.26232
1994	0.38044	-0.86288	-0.28185	2014	0.35389	-0.93177	-0.19347
1995	0.36269	-0.9665	-0.16504	2015	0.33874	-0.92598	-0.18876
1996	0.37044	-0.87807	-0.25916	2016	0.3431	-0.97423	-0.14349
1997	0.31753	-0.78832	-0.31251	2017	0.35038	-1.00982	-0.11295
1998	0.34631	-0.80148	-0.31845	2018	0.37437	-1.08296	-0.05719
1999	0.35272	-0.80257	-0.32184	2019	0.41805	-1.11925	-0.05552

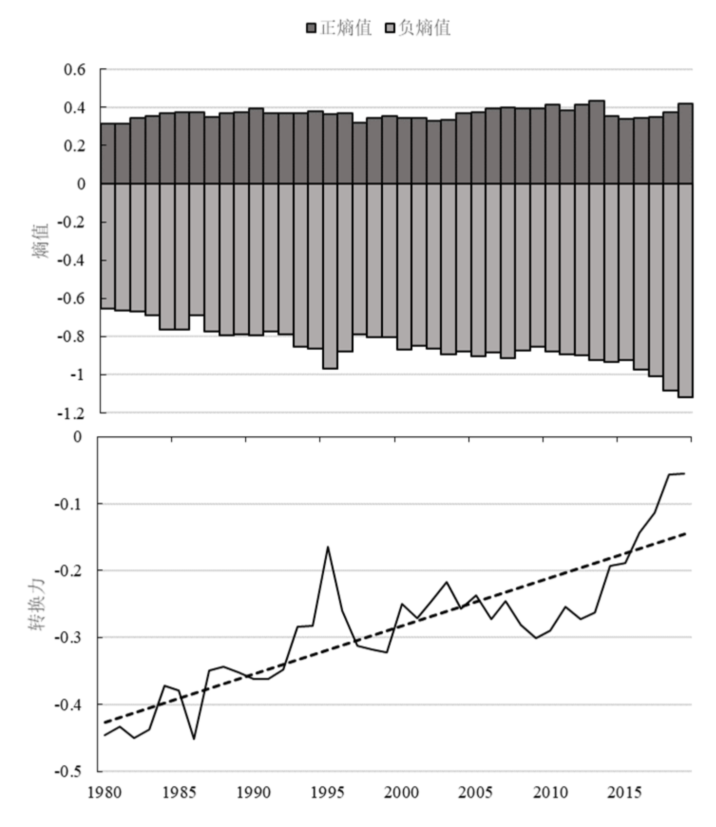


图 5　1980-2019 年间黄河流域生态-人类社会系统正熵流、负熵流及稳态转换动力值变化

Fig. 5 Changes in positive entropy flow, negative entropy flow and steady-state conversion dynamics of the ecological-economic social system of the Yellow River Basin from 1980 to 2019

3. 结论与讨论

3.1 结论

本研究以黄河流域为例，从系统性、整体性角度出发，利用熵权和耗散结构对流域生态-人类社会耦合系统进行动态模拟，揭示复杂系统指标体系间互反馈机制，首次量化了流域生态系统转换力，为保持和增强生态系统弹性和可持续性提供科学决策依据。研究发现：

（1)1980-2019年，黄河流域生态系统EQI值平均为0.64，最大值为0.70(2018年)，最小值为0.59（1986年），质量总体呈现震荡式向好趋势；

（2）复杂系统各项指标的熵权存在随时间序列的动态变化，从2010年到2019年，来沙量、居民平均收入成为影响系统的关键因素；

（3）1980-2019年系统稳态转换动力值均小于0，表明黄河流域生态-人类社会耦合系统的稳态转换力较低，但整体呈现震荡式上升趋势，整体趋势与达到稳态转换的临界条件逐渐接近。

3.2 讨论

本研究为开展流域生态系统保护成效监测评估提供了理论基础和计算原型，对实施黄河流域生态保护和高质量发展重大国家战略具有重要支撑作用，将为后续统筹考虑、综合施策提供科学依据：

（1）居民收入成为近年来影响系统 EQI 的关键因素，证明人类影响在黄河流域生态系统发展演变过程中起着至关紧要的作用，提升生态系统质量和稳定性，必须合理、科学地处理人与自然相互影响的关系，统筹和改善人与自然的关系，从人为改变自然、征服自然转向人水和谐发展。

（2）来沙量依然是制约 EQI 的敏感因素，黄河水少、沙多、水沙关系不协调依然是黄河流域生态文明建设需要长期关注的问题。在黄河中上游区域进一步加强水土流失、荒漠化治理是黄河流域生态系统良性发展的重要举措。

（3）在流域生态治理中，典型区域湿地面积变化率作为高频次重要权重因素，需要得到进一步关注。湿地不仅是黄河流域生态系统中重要组成部分，同时又和森林、草原、沙漠等元素相互影响、相互制约、甚至相互转变。推行草原森林河流湖泊修养生息，同时加强自然保护地和重要湖泊湿地生态保护是改善自然生态承载力，全面提升自然生态服务功能的关键举措。

此外，黄河流域生态环境状况存在系统性、复杂性、区域性和波动性，与河流、社会经济等子系统存在密切联系。在维持黄河健康生命过程中，如何科学性、系统性、全面性评价重大工程的生态环境影响力、系统演变驱动力、高质量发展支撑力之间的相互协调关系还有待进一步研究。

参考文献：

[1] 刘华祥. 流域水污染治理模式创新研究[J]. 广东化工, 2018,45(06):175-176.(LIU H X. Study on innovation of watershed water pollution control mode[J]. Journal of Guangdong chemical, 2018,45(06):175-176.(in Chinese))

[2] 何航, 赵健, 刘庆庆, 等. 区域水资源短缺类型界定和宏观分析[J]. 环境影响评价, 2019,41(05):36-39.(HE H, ZHAO J, LIU Q Q, et al. Definition and macroscopic analysis of regional water resource shortage types[J]. Journal of Environmental Impact Evaluation, 2019,41(05):36-39.(in Chinese))

[3] 张彦洪, 李生潜, 王磊, 等. “后石羊河流域治理时代”水资源管理策略[J]. 中国水利, 2019(05):19-21.(ZHAGN Y H, LI S Q, WANG L, et al. Water Resources Management Strategy in the Houshiyang River Basin Governance Era[J]. China Water Resources, 2019,(05):19-21.(in Chinese))

[4] 中共中央关于制定国民经济和社会发展
第十四个五年规划和二〇三五年远景目标的建议[EB/OL]. [2021-1-31]. http://paper.people.com.cn/rmrb/html/2020-11/04/nw.D110000renmrb_20201104_1-01.htm.

[5] 陈强, 陈云浩, 王萌杰, 等. 2001-2010 年洞庭湖生态系统质量遥感综合评价与变化分析[J]. 生态学报, 2015,35(13):4347-4356.(CHEN Q, CHEN Y H, WANG M J, et al. Ecosystem quality comprehensive

evaluation and change analysis of Dongting Lake in 2001—2010 based on remote sensing[J]. Acta ecologica sinica, 2015,35(13):4347-4356.(in Chinese))
[6] 梁变变, 石培基, 王伟, 等. 基于RS和GIS的干旱区内陆河流域生态系统质量综合评价——以石羊河流域为例[J]. 应用生态学报, 2017,28(1):199-209.(LIANG B B, SHI P J, WANG W, et al. Comprehensive assessment of ecosystem quality in arid land inland river basin based on RS and GIS: A case study of Shiyang River Basin[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017,28(1):199-209.(in Chinese))
[7] Folke C, Carpenter S R, Walker B, et al. Resilience Thinking: Integrating Resilience, Adaptability and Transformability[J]. Ecology & Society, 2010,15(4):299-305.
[8] Angeler D G, Allen C R. Quantifying resilience[J]. Journal of Applied Ecology, 2016,53(3).
[9] Biggs R, Carpenter S R, Brock W A. Turning Back From The Brink: Detecting An Impending Regime Shift In Time To Avert It[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2009,106(3):826-831.
[10] Arrow K, Bolin B, Costanza R, et al. Economic growth, carrying capacity, and the environment[J]. Science, 1996,1(5210):104-110.
[11] Filatova T, Polhill J G, Van Ewijk S. Regime shifts in coupled socio-environmental systems: Review of modelling challenges and approaches[J]. Environmental Modelling & Software, 2015,75(JAN.):333-347.
[12] Gunderson L, Cosens B A, Chaffin B C, et al. Regime shifts and panarchies in regional scale social-ecological water systems[J]. Ecology and Society, 2017,22(1):1-31.
[13] 王帅, 傅伯杰, 武旭同, 等. 黄土高原社会-生态系统变化及其可持续性[J]. 资源科学, 2020,042(001):96-103.(WANG S, FU B J, WU X T, et al. Dynamics and sustainability of social-ecological systems in the Loess Plateau[J]. Resources Science, 2020,042(001):96-103.(in Chinese))
[14] Reyers B, Folke C, Moore M, et al. Social-Ecological Systems Insights for Navigating the Dynamics of the Anthropocene[J]. Social Science Electronic Publishing, 2018,43(1):267-289.
[15] 邬建国. 耗散结构,等级系统理论与生态系统[J]. 应用生态学报, 1991,2(2):181-186.(WU J G. Dissipative Structure, Hierarchy System Theory and Ecosystems[J]. 应用生态学报, 1991,2(2):181-186.(in Chinese))
[16] 韩斌. 企业战略联盟自组织演化机制研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2008.(HAN B. Study on self-organization evolution mechanism of enterprise strategic alliance[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2008.(in Chinese))
[17] 周密. 我国商业银行金融创新系统的运作及其自组织演化研究[D]. 南京: 河海大学, 2007.(ZHOU M. The operation and self-organization evolution of financial innovation system of commercial banks in China[D]. Nanjing: Hohai University, 2007.(in Chinese))
[18] 赵焱, 王明昊, 李皓冰, 等. 水资源复杂系统协同发展研究[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2017.(ZHAO Y, WANG M H, LI H B, et al. Research on synergistic development of water resources complex system: [M].Zhengzhou: Yellow River Conservancy Press, 2017.(in Chinese))
[19] 提升生态系统质量和稳定性（深入学习贯彻党的十九届五中全会精神）[EB/OL]. [2021-1-18]. http://paper.people.com.cn/rmrb/html/2021-01/08/nw.D110000renmrb_20210108_1-09.htm.
[20] 冯文娟, 李海英, 徐力刚, 等. 河流健康评价:内涵、指标、方法与尺度问题探讨[J]. 灌溉排水学报, 2015,34(3):34-39.(FENG W J, LI H Y, XU L G, et al. River Health Assesment: Intension, Indexes, Methods and Scales[J]. Journal of Irrigation ang Drainage, 2015,34(3):34-39.(in Chinese))

[21] 马知恩，周义仓．常微分方程定性与稳定性方法[M]．北京：科学出版社，2015.(M Z E, ZHOU Y C. Qualitative and stability methods for ordinary differential equations: [M].Beijing: science press, 2015.(in Chinese))
[22] 杜现增，袁榆梁，孟钰，等．基于复合模糊物元-熵权组合模型的淮河干流健康综合评价[J]．水资源保护，2021.(DU X Z, YUAN Y L, MENG Y, et al. Comprehensive evaluation of Huaihe River mainstream health based on compound fuzzy matter element and entropy weight method combination[J]. Water Resources Protection, 2021,.(in Chinese))
[23] 张远生，练继建，金鑫，等．黄河流域发展质量综合评估计算方法研究[EB/OL]．[2021-2-3]. http://www.chinaxiv.org/abs/202102.00003.
[24] ChinaXiv.org 中国科学院科技论文预发布平台[EB/OL]．[2021-2-22]. http://www.chinaxiv.org/abs/202102.00012.
[25] 谢平．从生态学透视生命系统的设计、运作与演化[M]．北京：科学出版社，2013.(XIE P. Scaling Ecology to Understand Natural Design of Life Systems and Their Operations and Evolutions——Integration of Ecology, Genetics and Evolution through Reproduction: [M].Beijing: Science express, 2013.(in Chinese))
[26] Holling C S. Resilience and stability of ecological systems[J]. Annual Review of Ecology & Systematics, 1973,4(1):1-23.
[27] 王萍．陆地生态系统稳定性及其判别[D]．武汉：中国地质大学，2008.(WANG P. The Stability of Terrestrial Ecosystem and Its Discrimination[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2008.(in Chinese))
[28] Bascompte J, Sole R V. Self-organization in complex ecosystems[M].Princeton: Princeton University Press, 2012.

（通讯作者：曹智伟 Email:zhiwei.cao@outlook.com）

作者贡献声明：

张金良：提出研究思路，设计研究方案；
曹智伟,谭培影,张超：论文起草，数据分析，设计研究方案；
郭鹏程,金鑫：论文最终版本修订。